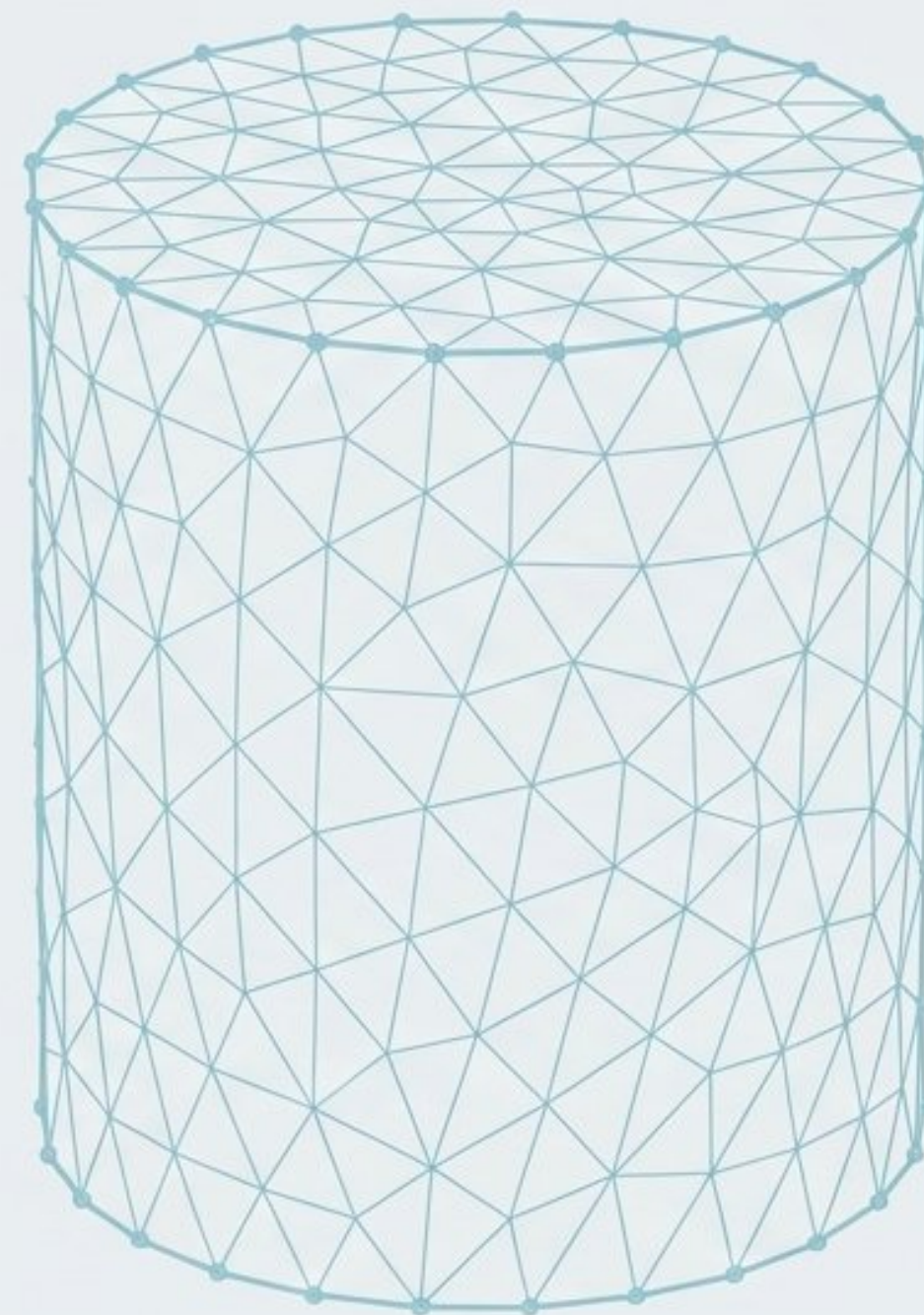


3D МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ У ПОВЕРХНЕВИХ ШАРАХ ЗЕМНОЇ КОРИ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Комплексний підхід до прямої
динамічної задачі сейсморозвідки

Аспірант:
Рендзеняк Назар

Науковий керівник:
ст.н.с., к.т.н. Брич Тарас

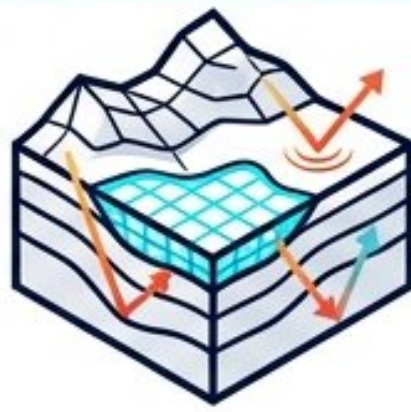


Паспорт Дослідження: Інженерний Каркас



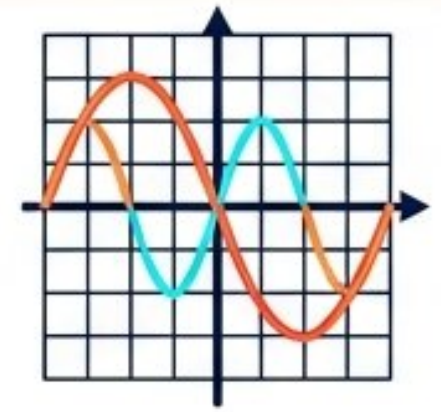
Мета (Goal)

Розробка, алгоритмічна адаптація та верифікація методики 3D-моделювання сейсмічних полів у складнопобудованих середовищах методом скінченних елементів (МСЕ).



Об'єкт (Object)

Процеси поширення, інтерференції, дифракції та поглинання пружних хвиль (P, S, поверхневі) у 3D багат шарових середовищах із локальними неоднорідностями.



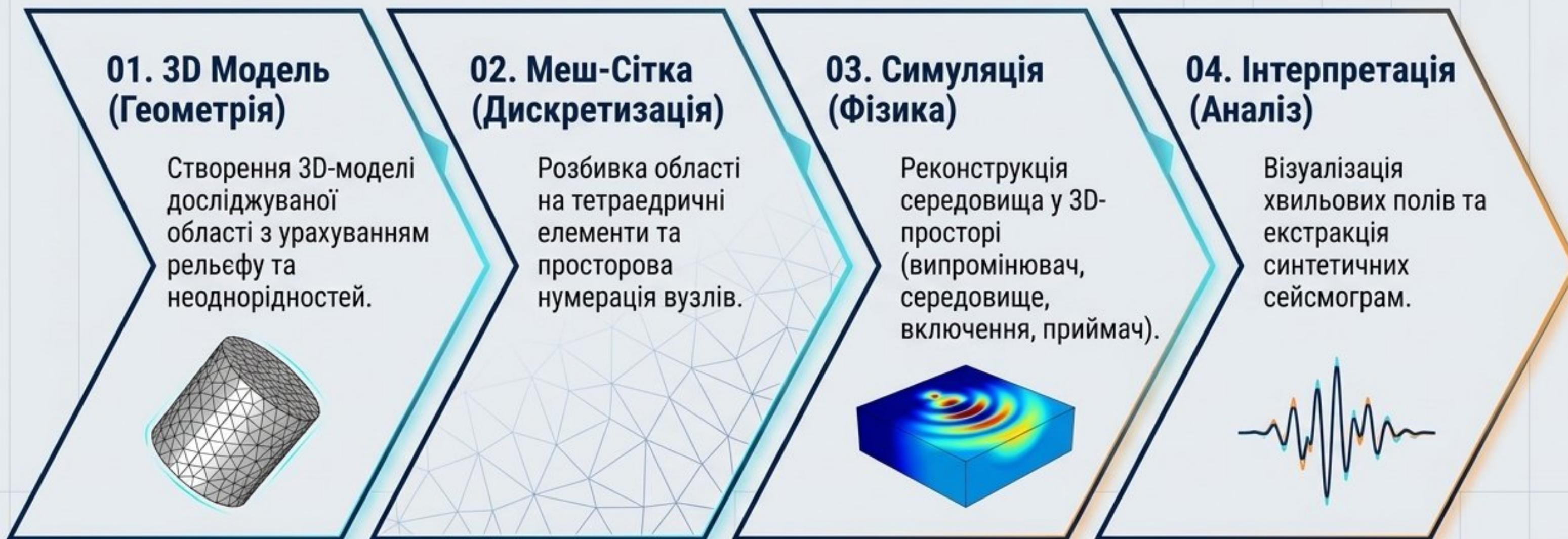
Предмет (Subject)

Математичні моделі, умови штучного обмеження простору, просторово-часові функції джерела та характеристики хвильових полів.

Дорожня Карта Проекту (3 Роки)



4-Етапний Конвеєр Моделювання



Матриця Оцінки Програмного Забезпечення

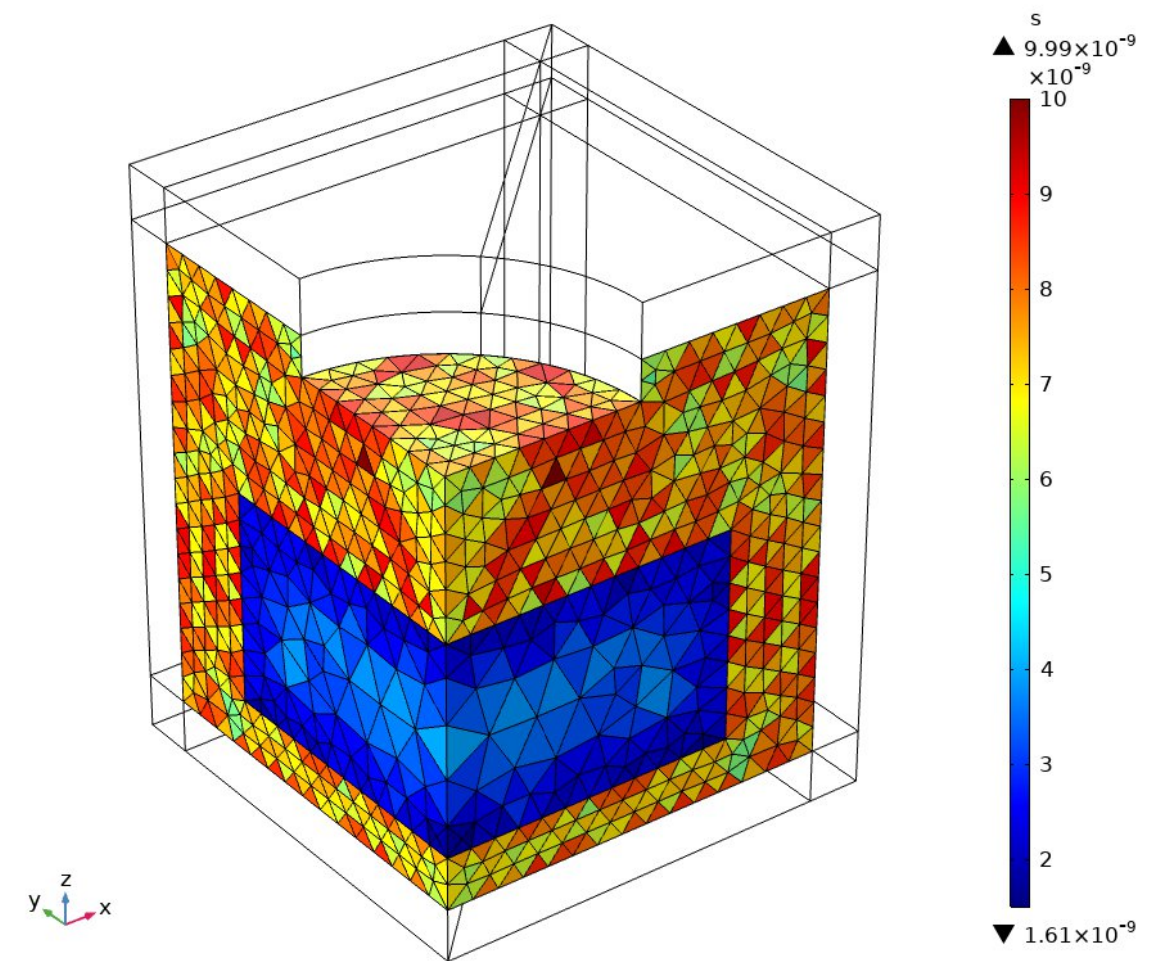
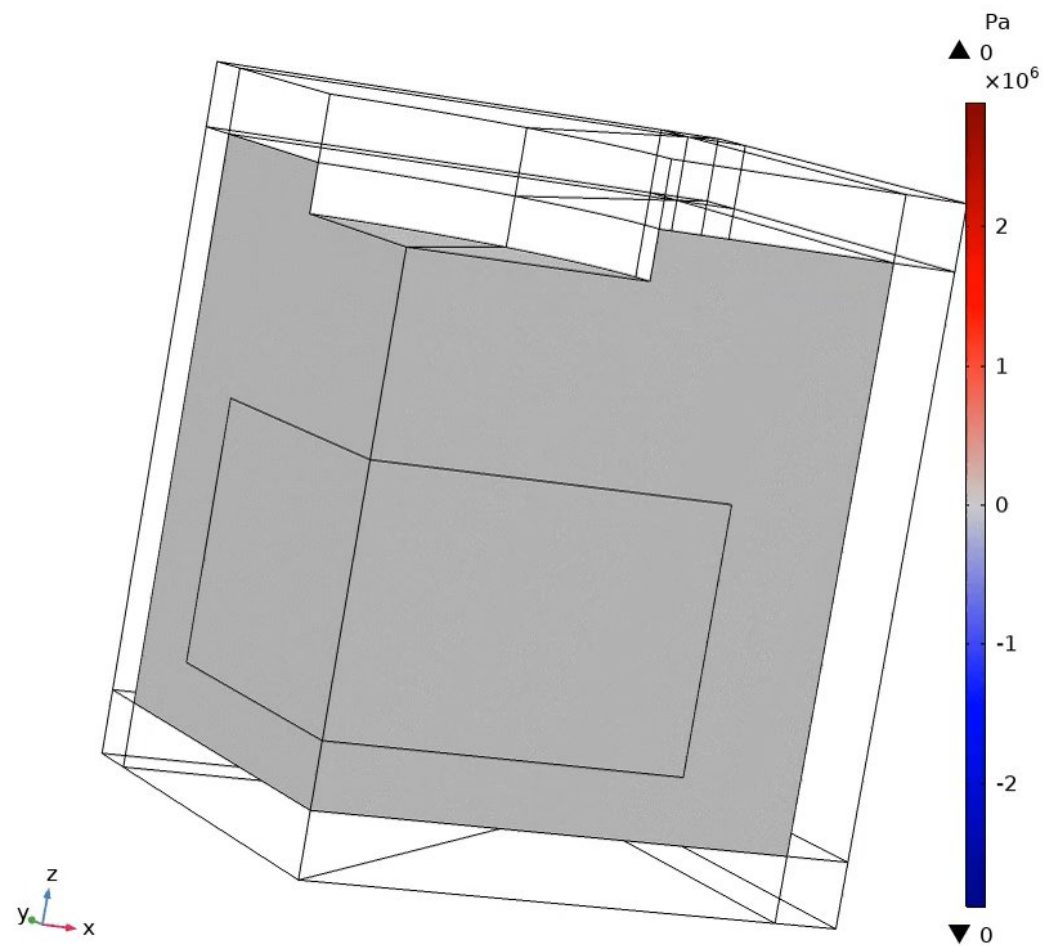
Програмний Комплекс	3D Моделювання	Генерація Сіток	Фізична Симуляція
Blender / FreeCAD	✓ Так	✗ Ні	✗ Ні
Gmsh / TetGen	✗	✓	✗
Unity / SOFA	✓	⚠ Частково	✗
COMSOL Multiphysics	✓	⚠	✓

Висновок:

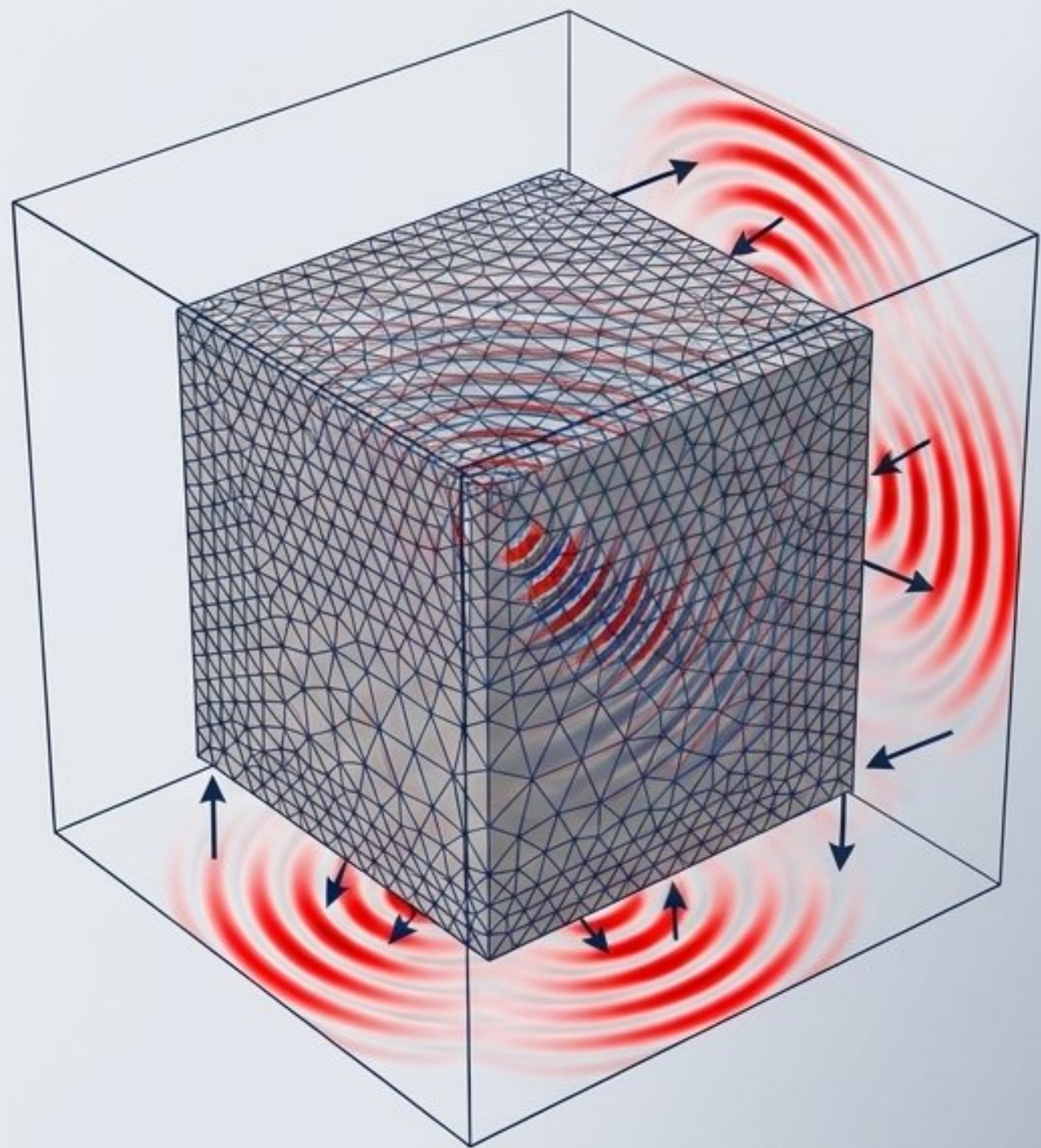
COMSOL Multiphysics обрано як єдине оптимальне середовище, що інтегрує потужне моделювання та унікальні можливості симуляції пружних хвиль у часі (Time Explicit Elastic Wave).

Comsol Multiphysics

Elastic Waves Time Explicit



Проблема Штучного Обмеження Простору

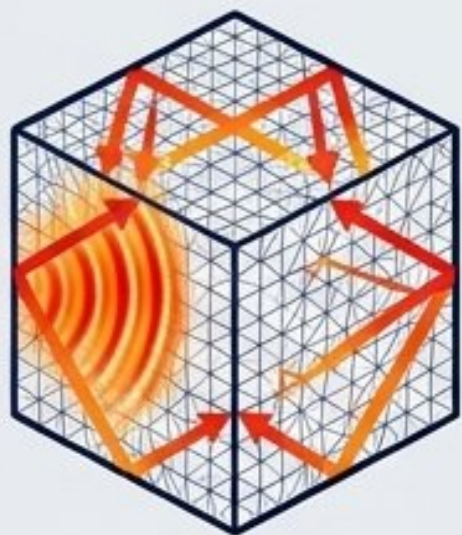


У реальному геологічному середовищі енергія землетрусу розсіюється в нескінченність. У 3D-моделюванні ми змушені обрізати простір.

Наслідок: Це генерує масивні паразитні відбиття від країв розрахункової сітки, що повністю спотворює хвильове поле та унеможлиблює точний аналіз корисного сигналу.

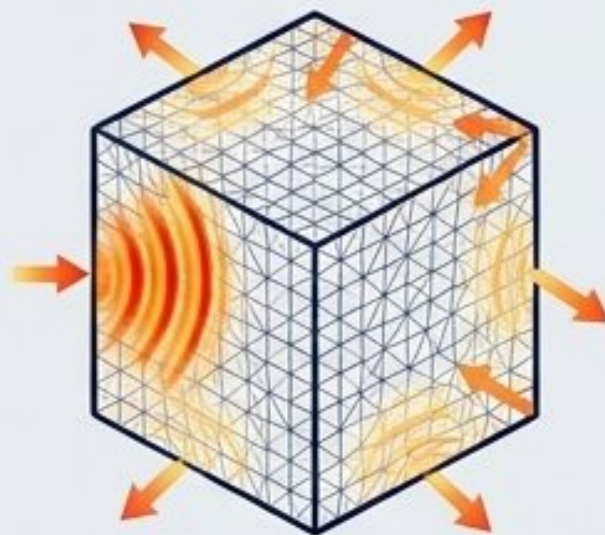
Математичне Вирішення Граничної Проблеми

Жорстка межа (Reflecting)



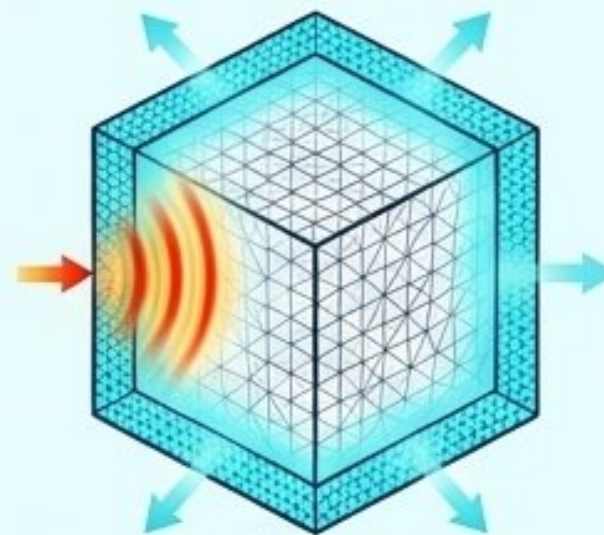
Повне відбиття хвилі.
Використовується лише для
контрольних тестів.

Низьке відбиття (Low-Reflecting)



Дешевша обчислювальна вартість,
але критична залежність від кута
падіння хвилі.

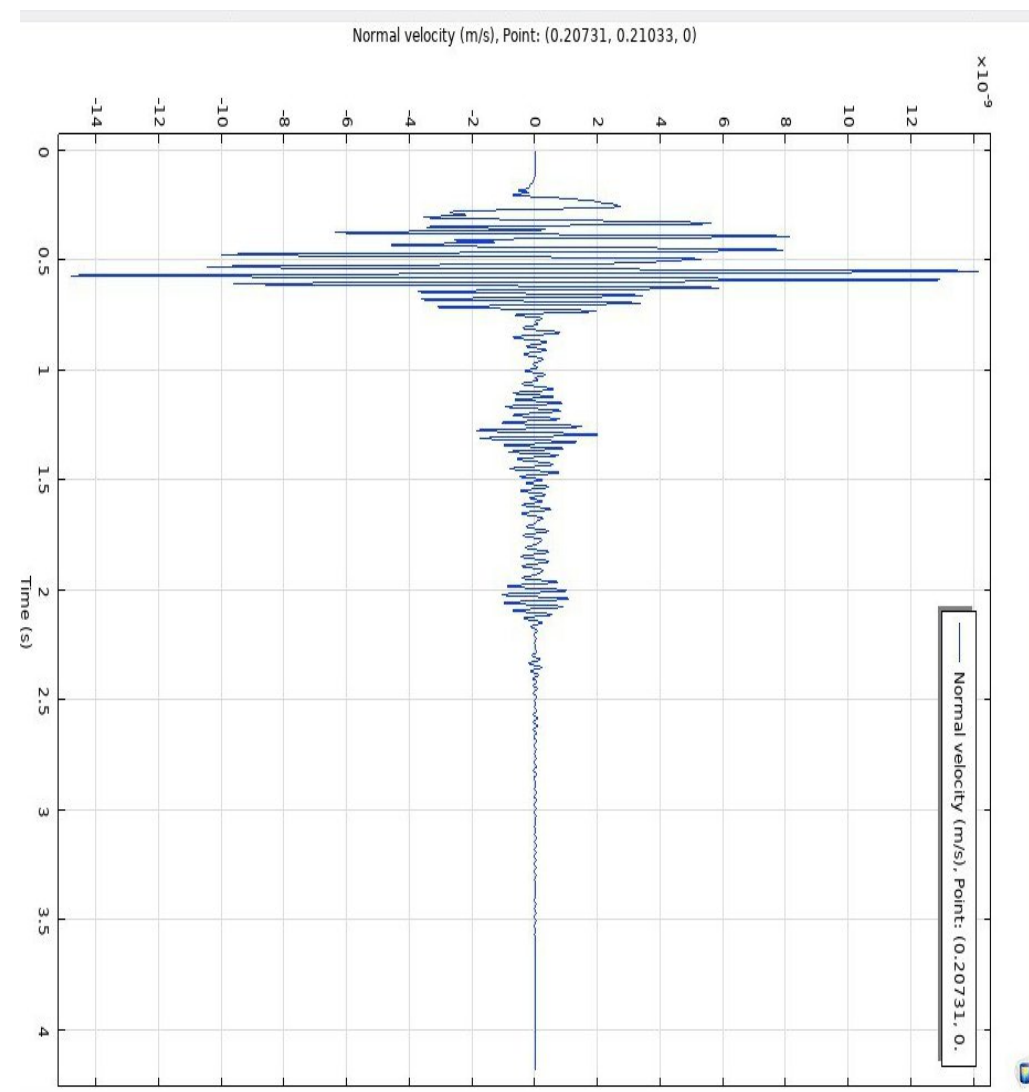
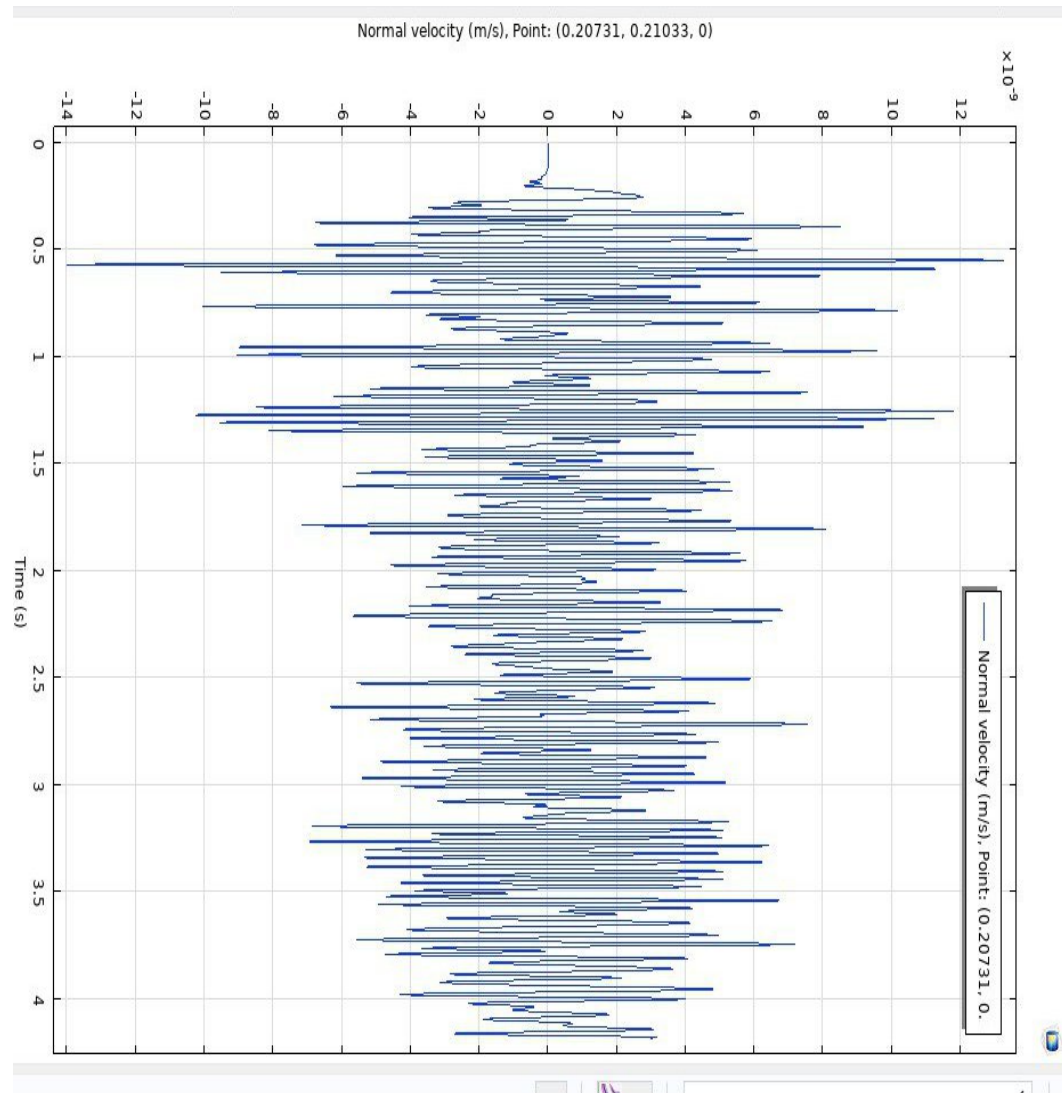
Absorbing Layers (AL) [ОПТИМАЛЬНО]



Оптимальний компроміс. Динамічне
гасіння енергії за умови
правильного налаштування товщини.

$$La = Vs \cdot 0.25 [c]$$

Товщина шару жорстко прив'язана до швидкості поперечної хвилі (V_s).

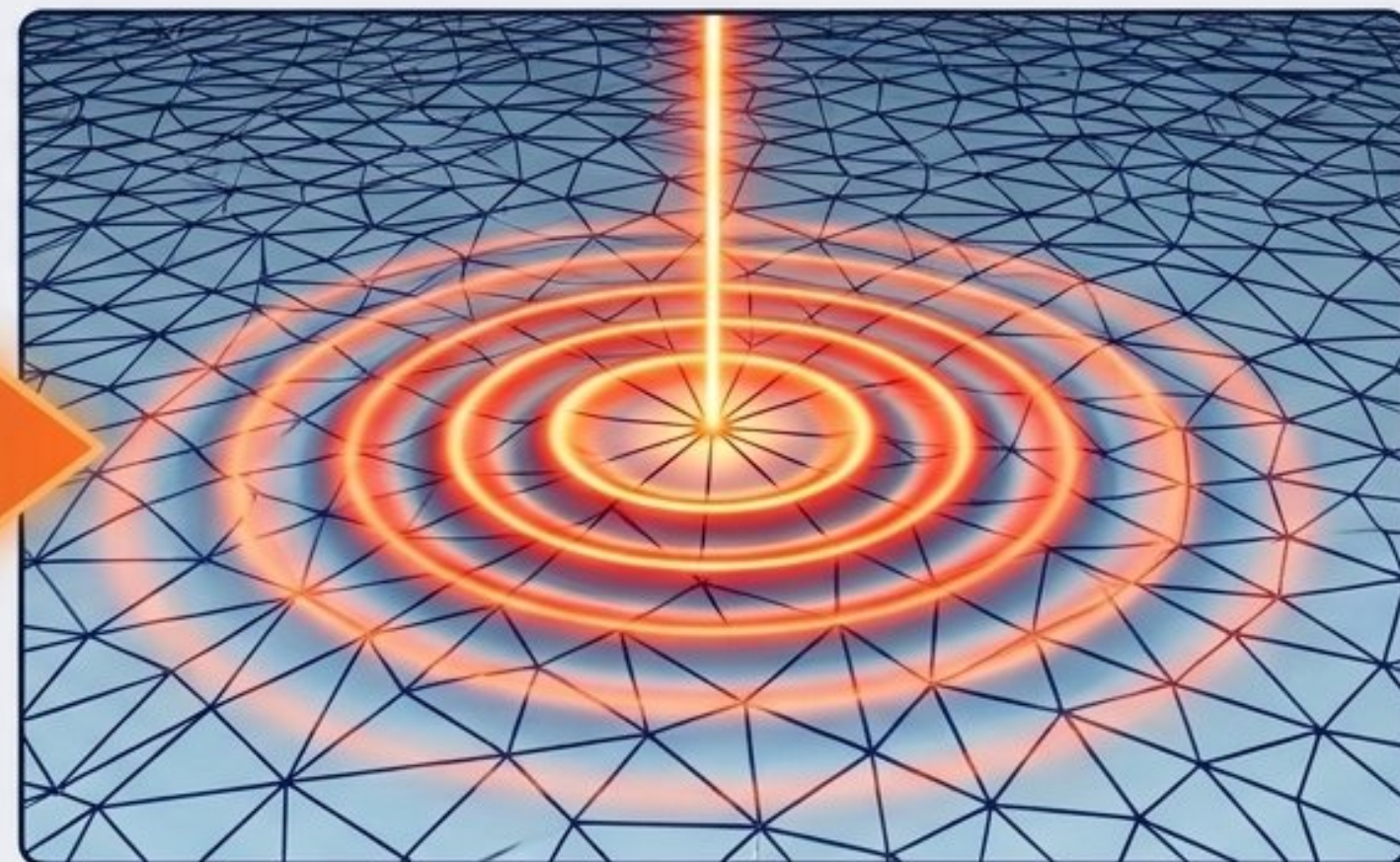


Ефективність Використаних Підходів

Анатомія Цифрового Джерела

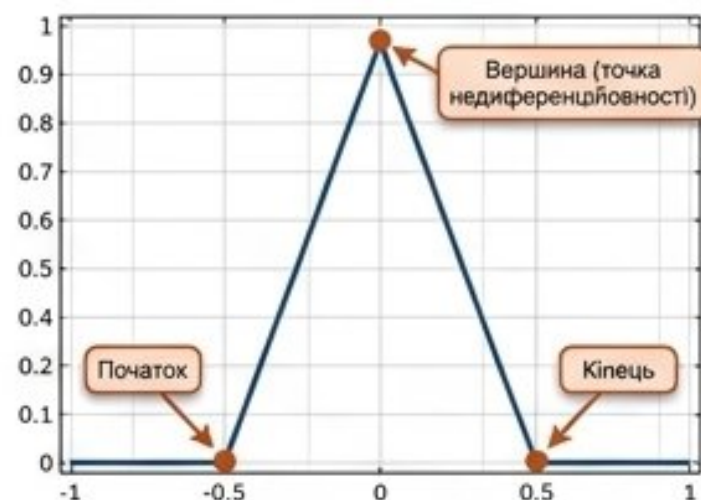
У цифровому середовищі джерело землетрусу — це залежне від часу граничне навантаження або об'ємна сила. Математична форма цього вхідного імпульсу фундаментально формує весь частотний спектр майбутньої симуляції.

```
parameters:  
  source: 'Boundary Load'  
  type: 'Time-Dependent'  
  magnitude: 15.0 kN  
  duration: 0.02 s  
  waveform: 'Gaussian Pulse'  
  location: [x=0, y=0, z=0]  
  
define_load(source, location, waveform);
```



Порівняльна Матриця Профілів Джерела

Трикутний Імпульс



Механіка

Строге лінійне наростання.

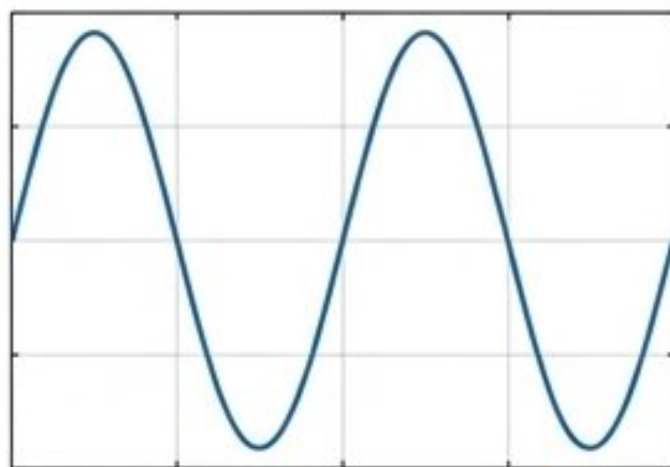
Вплив на спектр

Генерує артефакти через гострі вершини (недиференційовність).

Застосування

Для простих тестів.

Синусоїдальна Форма



Механіка

Гармонічні коливання.

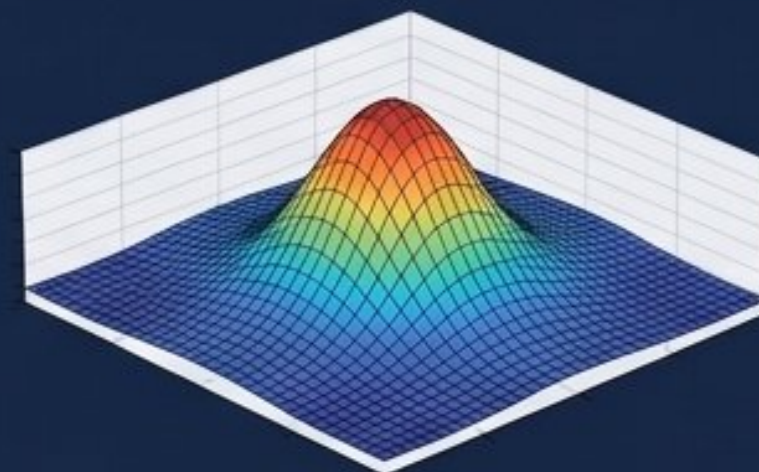
Вплив на спектр

Вузький спектр, зосереджений на одній частоті.

Застосування

Ідеально для аналізу резонансних явищ.

Гауссів та Дельта-Імпульс



Механіка

Рівномірний просторовий розподіл енергії.

Вплив на спектр

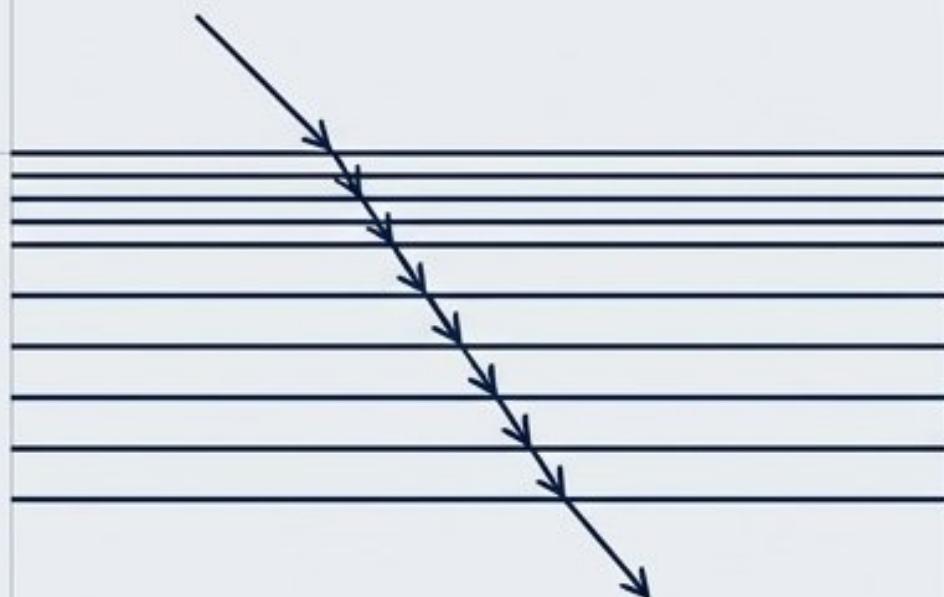
Абсолютно гладка, нескінченно диференційовна функція. Запобігає числовим ударним хвилям.

Застосування

Оптимально для сейсмозвідки.

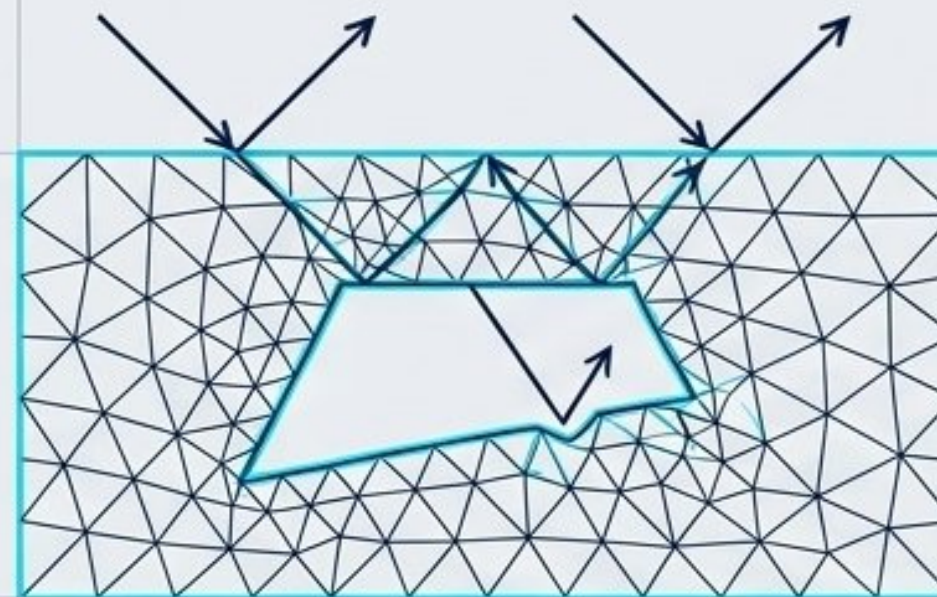
Обґрунтування Архітектури: Матричний метод vs. MSE

Матричний метод



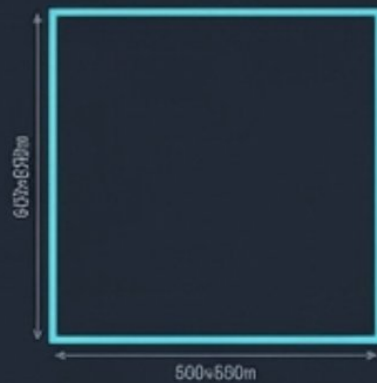
Підходить лише для плоскошаруватих розрізів та однократного проходження хвиль. Обмежений у складній геометрії.

Метод скінченних елементів (МСЕ)

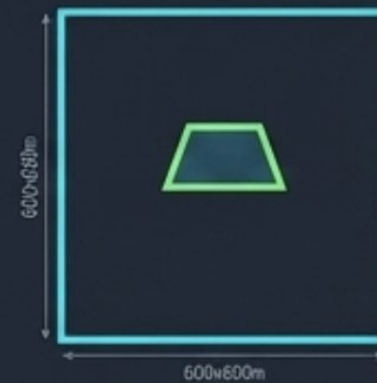


Здатність інтегрувати складні локальні неоднорідності (рельєф, трапецієподібні включення) та моделювати повне хвильове поле (відбиття, дифракція). Абсолютна геометрична гнучкість.

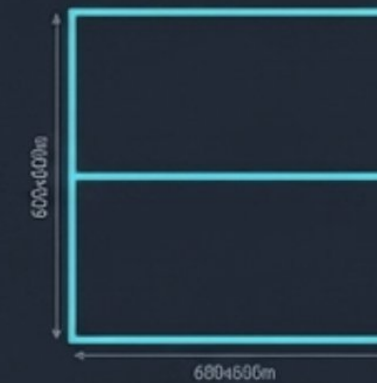
Матриця сценаріїв експериментальних моделей



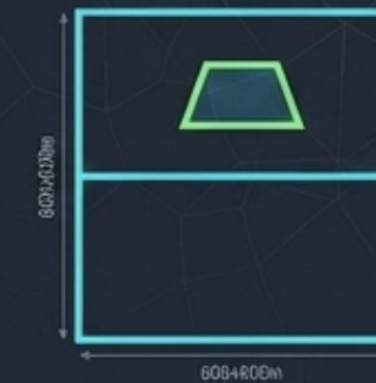
1: Однорідне середовище (Базовий фон).



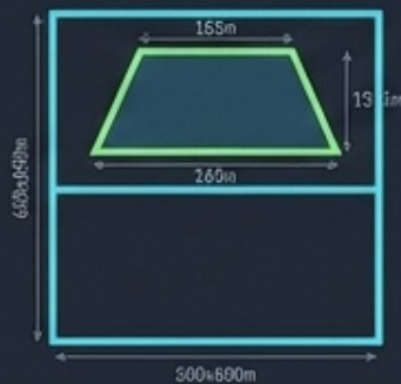
2: Однорідне + трапецієподібне включення.



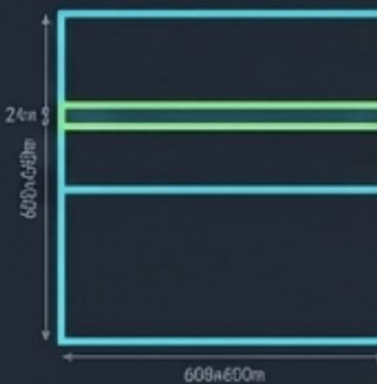
3: Двошарове середовище (Горизонтальна межа).



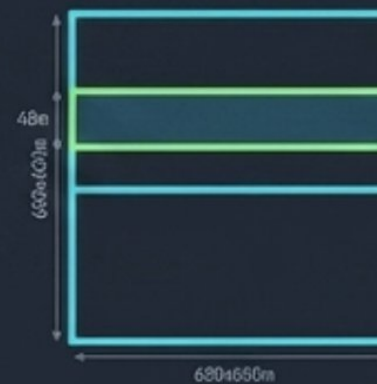
4: Двошарове + мале трапецієподібне включення.



5: Двошарове + велике включення (основи 165/118 м).



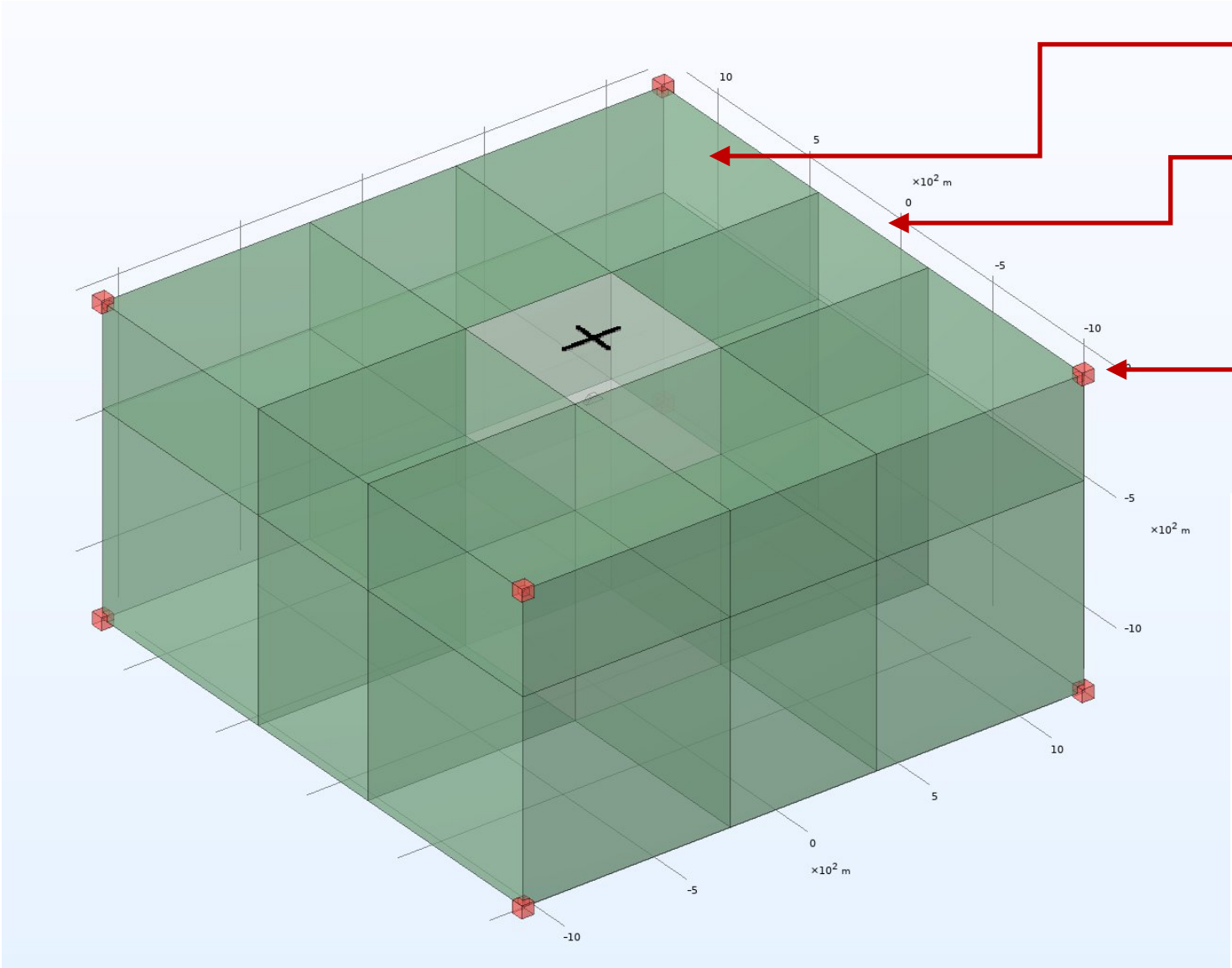
6: Двошарове + додатковий 24-м шар.



7: Двошарове + додатковий 48-м шар.



Геометрія та крайові умови



Absorbing Layer

Low-Reflecting Boundary

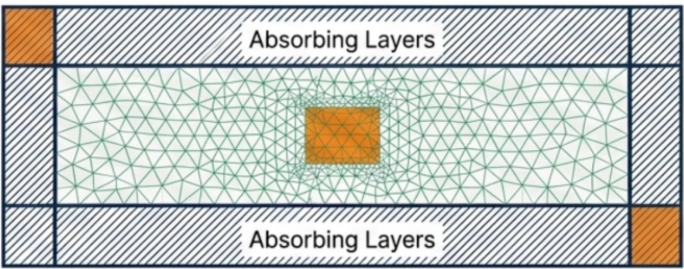
Anchor Points

Товщина динамічного поглинаючого шару жорстко прив'язана до

$$L_a = V_s \cdot 0.25 [c]$$

жорстко прив'язана до швидкості поперечної хвилі (V_s).

Товщина динамічного поглинаючого шару поперечної хвилі (V_s).



Товщина динамічного поглинаючого шару поперечної хвилі (V_s).

Жорстка межа (Reflecting)	Низьке відбиття (Low-Reflecting)	Absorbing Layers (AL)
✗ Повне відбиття хвилі. Спотворює поле.	⚠ Чутливе до кута падіння та спектра.	✓ Динамічне гасіння енергії.

Параметри верхнього шару:

$H = 408 \text{ m}$

$V_p = 2900 \text{ m/c}$

$V_s = 1550 \text{ m/c}$

Локальна неоднорідність:

Глибина залягання = 240 m

Форма: Трапеція (основи 70 та 23 m з висотою 24 m

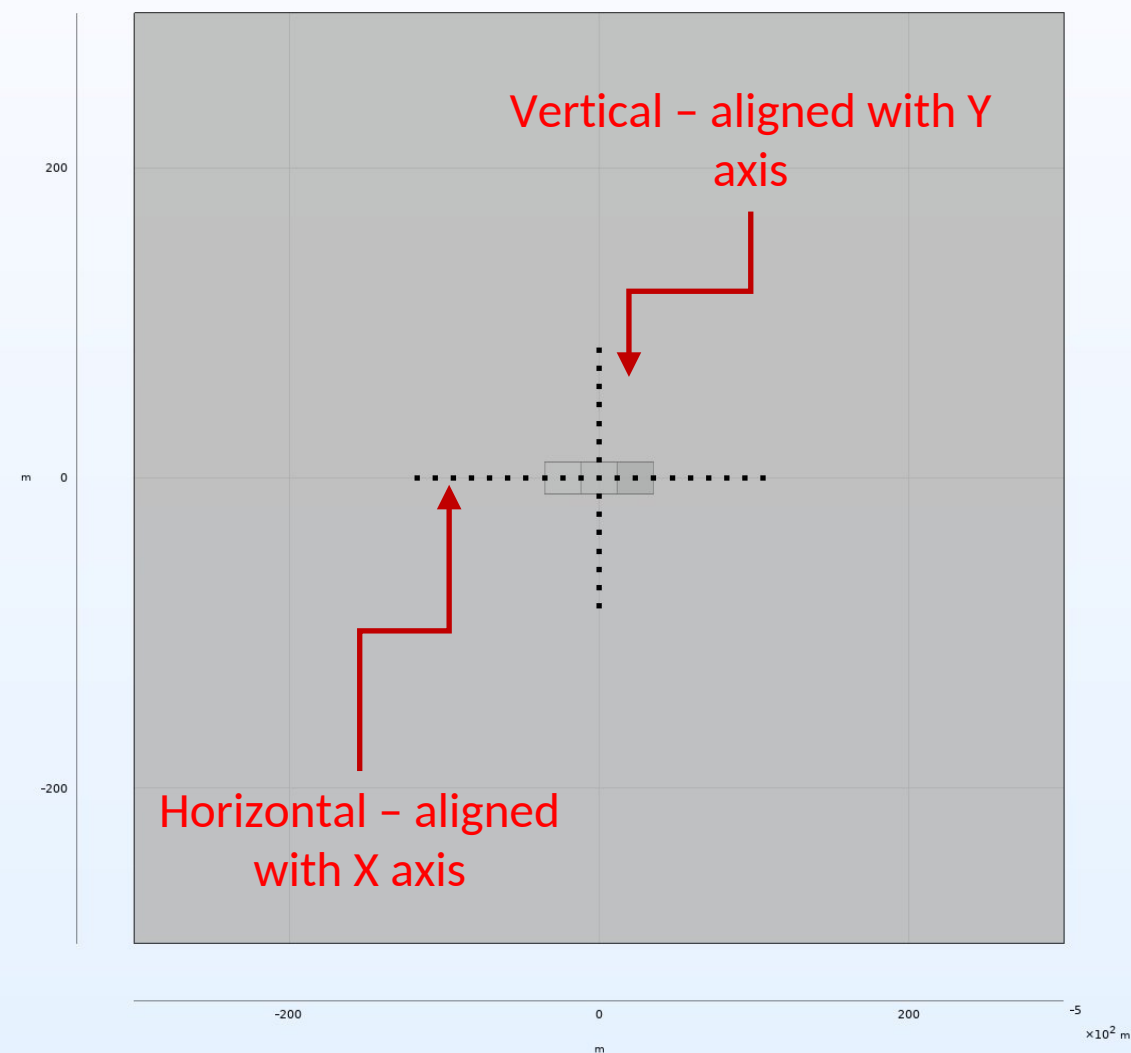
Параметри нижнього шару:

$H = 1000+ \text{ m}$

$V_p = 3400 \text{ m/c}$

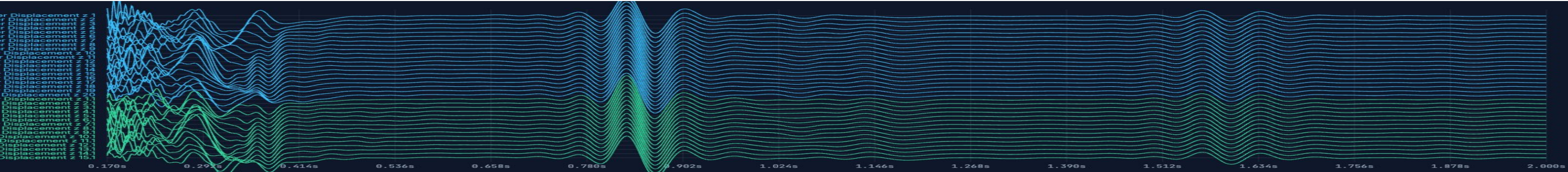
$V_s = 1700 \text{ m/c}$

Розміщення приймачів

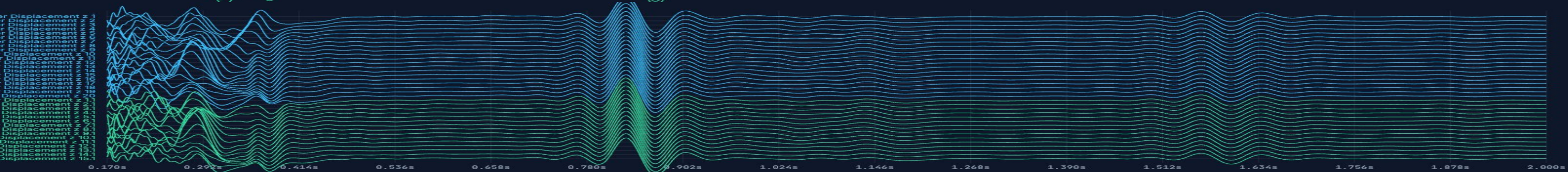


Результати симуляції: Аналіз синтетичних сейсмограм

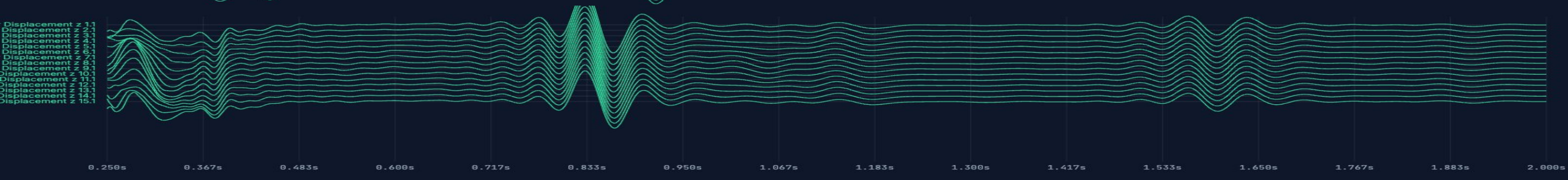
2-1



2-2



2-3
(vertical)

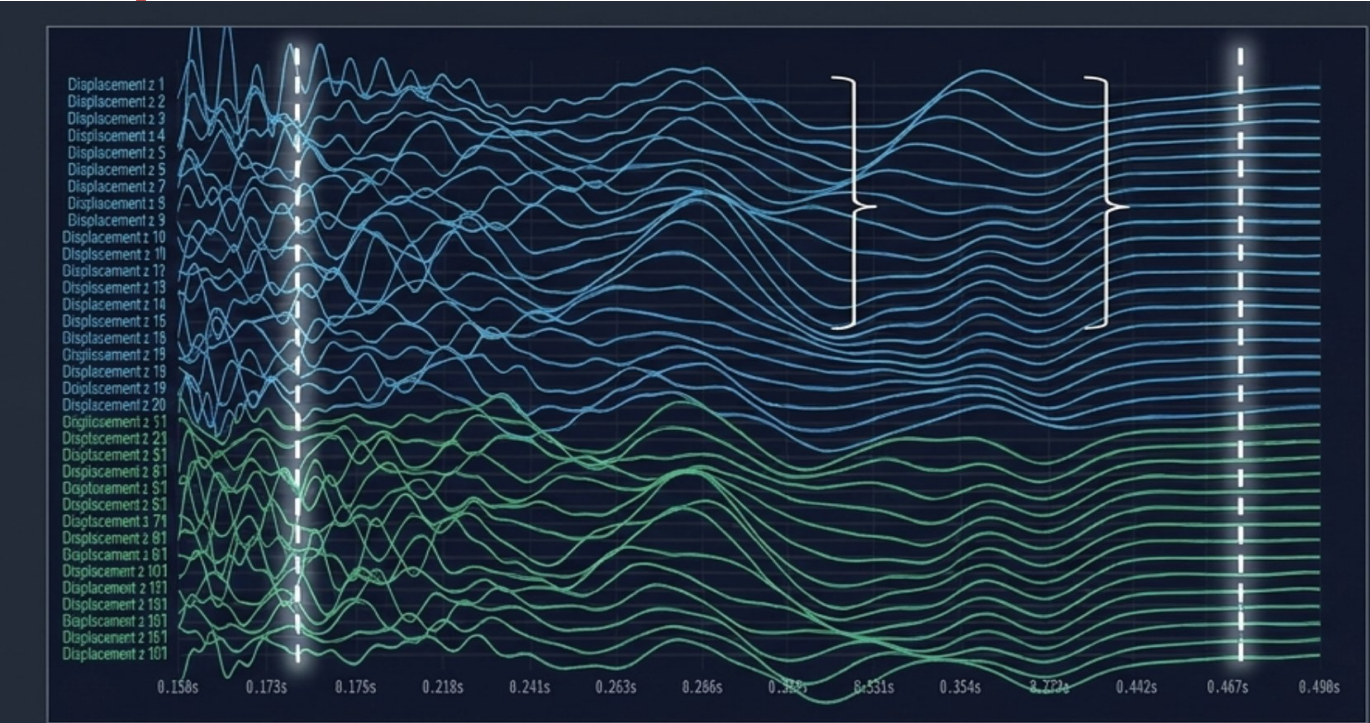
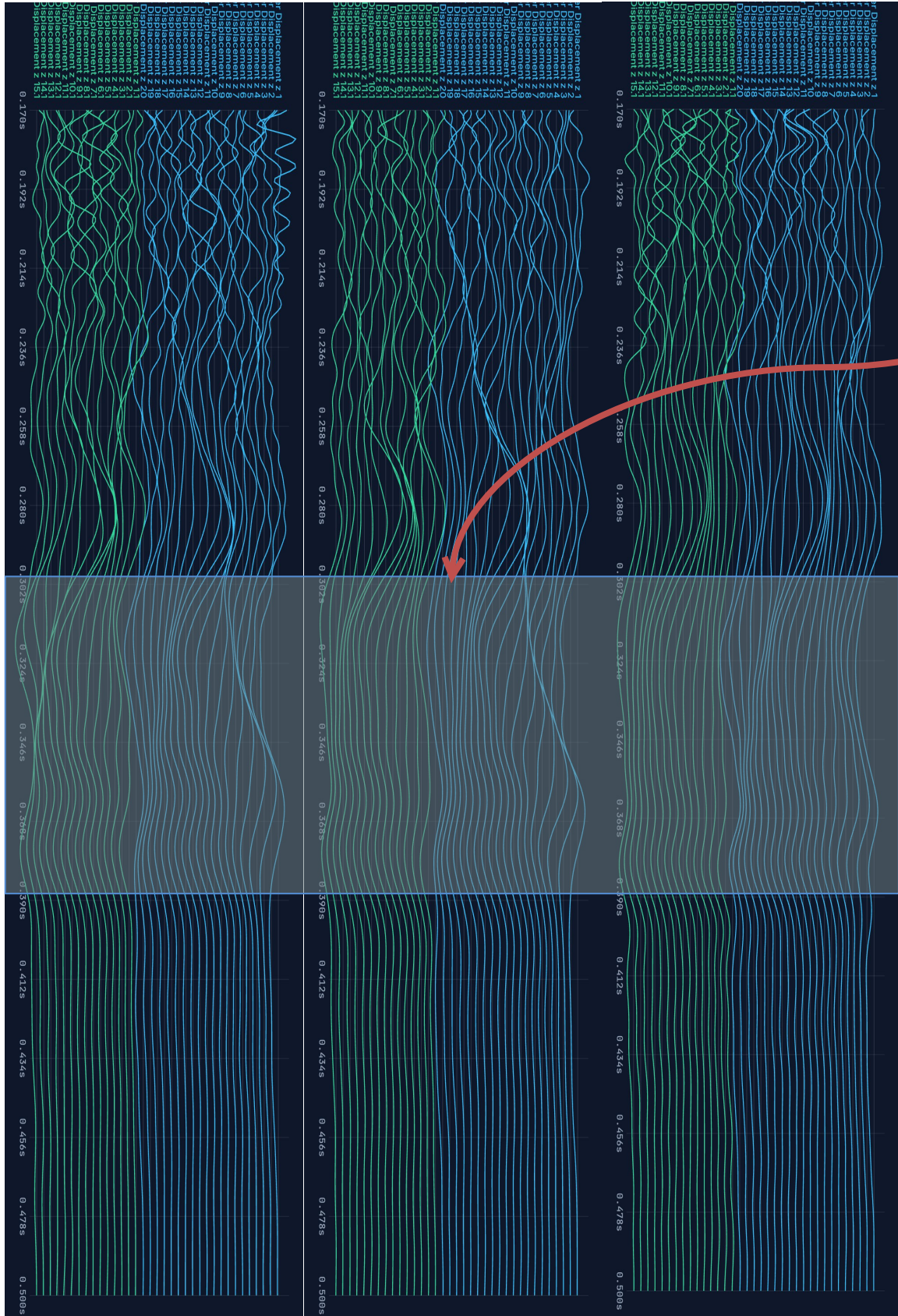


2-1

2-2

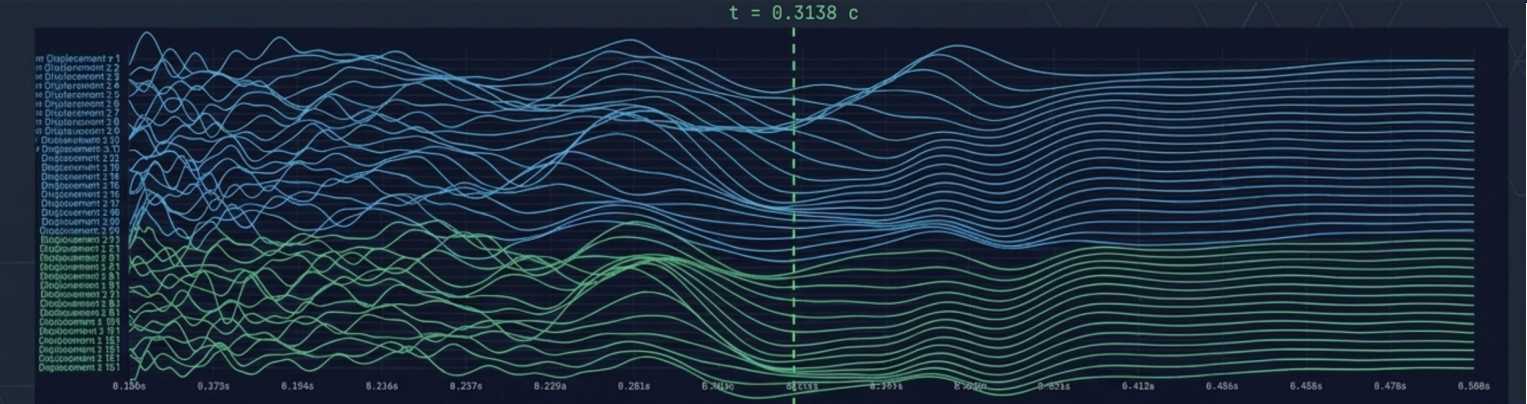
2-3

Чітка фіксація відбитих хвиль від трапецієподібної неоднорідності на центральних трасах



Diagnostic Markers

- $t \approx 0.1846$ с: Чіткі вступи хвиль, відбитих від включення.
- Траси 8–10: Розташовані безпосередньо над центром включення (максимальна амплітуда).
- Траси 3–7 та 11–14: Запізнення сигналу вказує на дифракцію від похилих граней трапеції.
- $t = 0.4615$ с: Відбиття від жорстко закріпленої нижньої грані моделі.



Timing

Точний час вступу $t = 0.3138$ с.

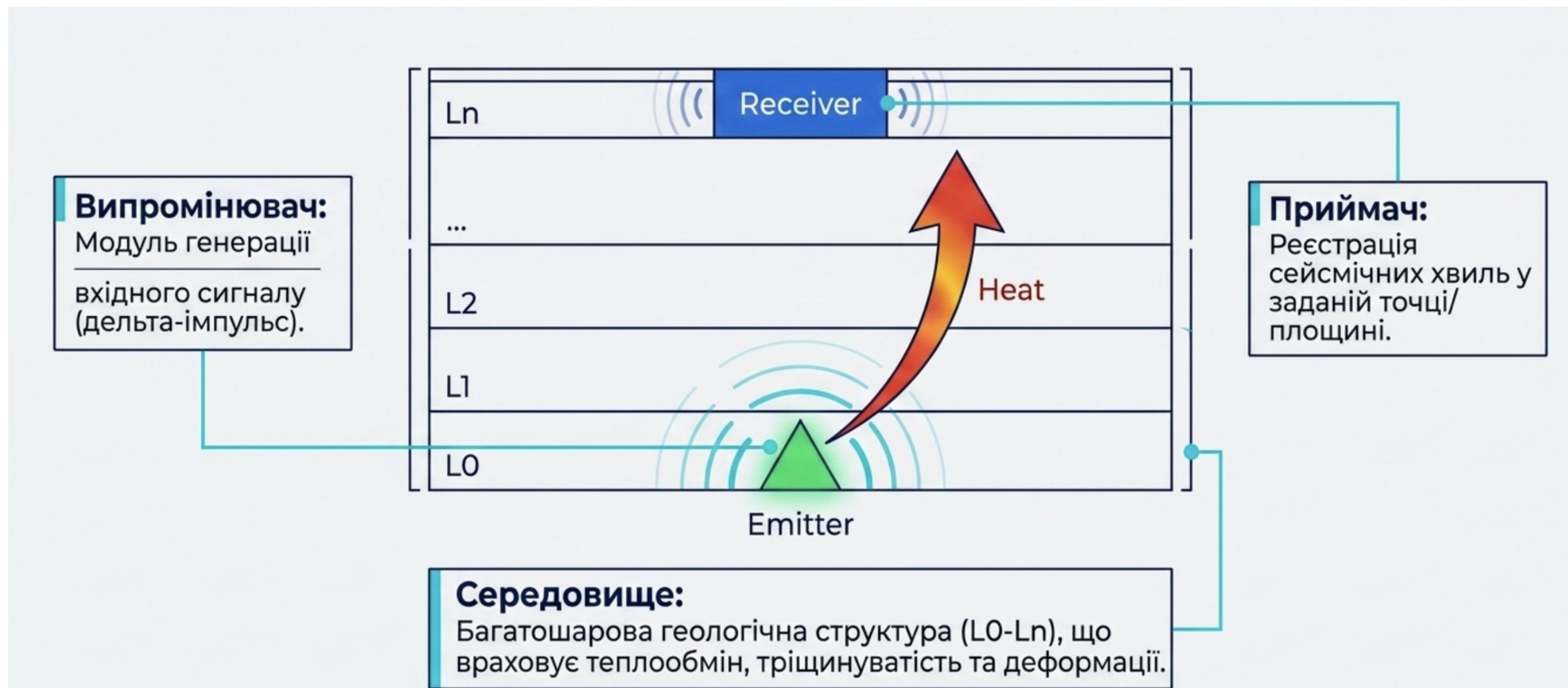
Observation

Чітко фіксується вступ хвилі, відбитої від межі двох шарів (глибина 498 м).

Amplitude Contrast

Амплітуда відбиття від геологічної межі є математично обґрунтовано та очікувано меншою за штучне відбиття від жорсткого дна моделі, підтверджуючи коректність збереження енергії в алгоритмі.

Розробка та апробація методики 3D моделювання сейсмічної активності методом скінченних елементів



Науково-організаційна діяльність та апробація результатів

Березень 2026 р. Участь у роботі Комісії фізики Землі / Геологічної комісії Наукового товариства ім. Шевченка (НТШ) при Карпатському відділенні ІГФ ім. С.І. Субботіна НАН України та ЛНУ ім. Івана Франка (м. Львів).

Представлено наукову доповідь щодо методів моделювання поглинаючих властивостей геологічного середовища у середовищі COMSOL Multiphysics.

Серпень 2026. Розширений семінар Відділу сейсмічності Карпатського регіону (ВСКР) ІГФ ім. С.І. Субботіна НАН України:

Виступ як основного доповідача на розширеному науковому семінарі ВСКР із презентацією результатів дисертаційного дослідження щодо методики 3D MCE-моделювання хвильових полів, параметричної адаптації моделей у COMSOL та розрахунку спектральних характеристик приповерхневих шарів під сейсмічними станціями Карпатського регіону.

Вересень 2026 р.: Участь у роботі Міжнародної наукової конференції «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах», присвяченої пам'яті Тараса, Юрія і Сергія Вербицьких (Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, м. Львів).

Стаття у науковому фаховому виданні (Геофізичний журнал):

Купльовський Б., Джуман Б., Брич Т., Стародуб Ю., Рендзеняк Н. Аналіз тектоніки території Рівненської області для побудови карт детального сейсмічного районування // Геофізичний журнал. — 2026.

Матеріали наукових доповідей та засідань:

Рендзеняк Н., Брич Т., Купльовський Б. Дослідження методів моделювання поглинаючих властивостей геологічного середовища в COMSOL // Наукове товариство ім. Шевченка. Комісія фізики Землі. КВ ІГФ ім. С.І. Субботіна НАН України. — Львів, 17.03.2026 р.

Дякую за увагу

